

PCT

WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro



INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE
INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation ⁷ : G06N 3/04		A2	(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 00/11601
			(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 2. März 2000 (02.03.00)
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE99/01949		(81) Bestimmungsstaaten: US, europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).	
(22) Internationales Anmeldedatum: 1. Juli 1999 (01.07.99)			
(30) Prioritätsdaten: 198 38 654.0 25. August 1998 (25.08.98) DE		Veröffentlicht Ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts.	
(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten ausser US): SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, D-80333 München (DE).			
(72) Erfinder; und			
(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): DECO, Gustavo [IT/DE]; Hauptstrasse 76, D-85579 Neubiberg (DE). SCHÜRMANN, Bernd [DE/DE]; Münchner Strasse 35, D-85778 Haimhausen (DE).			
(74) Gemeinsamer Vertreter: SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT; Postfach 22 16 34, D-80506 München (DE).			

(54) Title: METHOD FOR TRAINING A NEURAL NETWORK, METHOD FOR CLASSIFYING A SEQUENCE OF INPUT PARAMETERS USING A NEURAL NETWORK, NEURAL NETWORK AND ARRAY FOR TRAINING A NEURAL NETWORK

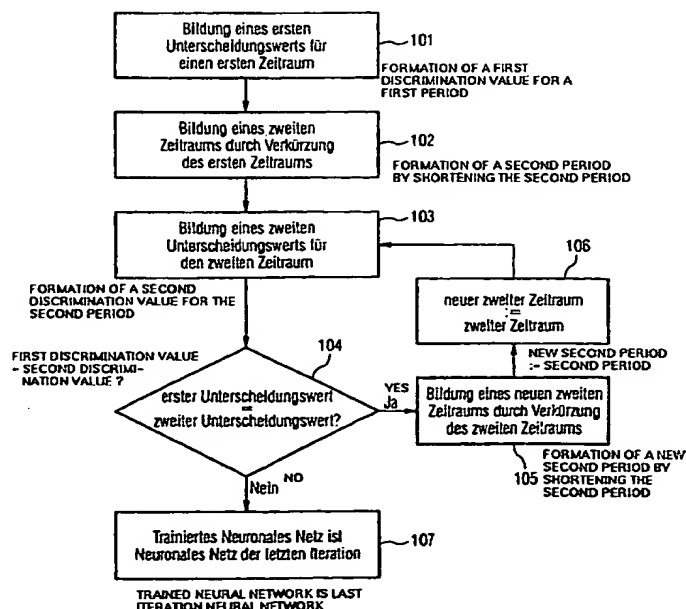
(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM TRAINIEREN EINES NEURONALEN NETZES, VERFAHREN ZUR KLASSIFIKATION EINER FOLGE VON EINGANGSGRÖSSEN UNTER VERWENDUNG EINES NEURONALEN NETZES, NEURONALES NETZ UND ANORDNUNG ZUM TRAINIEREN EINES NEURONALEN NETZES

(57) Abstract

The neural network is trained for a first period in such a way that a discrimination value is maximized, wherein the discrimination value is dependent on impulses formed by the pulsed neurons during the first period. The first period is shortened in an iterative manner and a second discrimination value is formed for the second period until the second discrimination value is smaller than the maximum discrimination value. The trained neural network is the neural network of the last iteration in which the second discrimination value equals the maximum discrimination value.

(57) Zusammenfassung

Für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wobei der Unterscheidungswert abhängig ist von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden. Iterativ wird der erste Zeitraum so lange verkürzt und für den zweiten Zeitraum ein zweiter Unterscheidungswert gebildet, bis der zweite Unterscheidungswert kleiner ist als der maximale Unterscheidungswert. Das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem maximalen Unterscheidungswert ist.



LEDIGLICH ZUR INFORMATION

Codes zur Identifizierung von PCT-Vertragsstaaten auf den Kopfbögen der Schriften, die internationale Anmeldungen gemäss dem PCT veröffentlichen.

AL	Albanien	ES	Spanien	LS	Lesotho	SI	Slowenien
AM	Armenien	FI	Finnland	LT	Litauen	SK	Slowakei
AT	Österreich	FR	Frankreich	LU	Luxemburg	SN	Senegal
AU	Australien	GA	Gabun	LV	Lettland	SZ	Swasiland
AZ	Aserbaidshjan	GB	Vereinigtes Königreich	MC	Monaco	TD	Tschad
BA	Bosnien-Herzegowina	GE	Georgien	MD	Republik Moldau	TG	Togo
BB	Barbados	GH	Ghana	MG	Madagaskar	TJ	Tadschikistan
BE	Belgien	GN	Guinea	MK	Die ehemalige jugoslawische Republik Mazedonien	TM	Turkmenistan
BF	Burkina Faso	GR	Griechenland			TR	Türkei
BG	Bulgarien	HU	Ungarn	ML	Mali	TT	Trinidad und Tobago
BJ	Benin	IE	Irland	MN	Mongolei	UA	Ukraine
BR	Brasilien	IL	Israel	MR	Mauretanien	UG	Uganda
BY	Belarus	IS	Island	MW	Malawi	US	Vereinigte Staaten von Amerika
CA	Kanada	IT	Italien	MX	Mexiko		
CF	Zentralafrikanische Republik	JP	Japan	NE	Niger	UZ	Usbekistan
CG	Kongo	KE	Kenia	NL	Niederlande	VN	Vietnam
CH	Schweiz	KG	Kirgisistan	NO	Norwegen	YU	Jugoslawien
CI	Côte d'Ivoire	KP	Demokratische Volksrepublik Korea	NZ	Neuseeland	ZW	Zimbabwe
CM	Kamerun			PL	Polen		
CN	China	KR	Republik Korea	PT	Portugal		
CU	Kuba	KZ	Kasachstan	RO	Rumänien		
CZ	Tschechische Republik	LC	St. Lucia	RU	Russische Föderation		
DE	Deutschland	LI	Liechtenstein	SD	Sudan		
DK	Dänemark	LK	Sri Lanka	SE	Schweden		
EE	Estland	LR	Liberia	SG	Singapur		

Beschreibung

Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes, Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines neuronalen Netzes, neuronales Netz und Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes, ein Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines neuronalen Netzes sowie ein neuronales Netz und eine Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes.

Ein neuronales Netz weist Neuronen auf, die zumindest teilweise miteinander verbunden sind. Eingangsneuronen des neuronalen Netzes werden Eingangssignale als Eingangsgrößen den Eingangsneuronen zugeführt. Das neuronale Netz weist üblicherweise mehrere Schichten auf. Abhängig von einem Neuron des neuronalen Netzes zugeführten Eingangsgrößen und einer für das Neuron vorgesehenen Aktivierungsfunktion generiert jeweils ein Neuron ein Signal, welches wiederum Neuronen einer weiteren Schicht als Eingangsgröße gemäß einer vorgebbaren Gewichtung zugeführt wird. In einer Ausgangsschicht wird in einem Ausgangsneuron eine Ausgangsgröße abhängig von Größen, die dem Ausgangsneuron von Neuronen der vorangegangenen Schicht zugeführt werden, generiert. Es existieren derzeit im wesentlichen zwei Ansätze hinsichtlich der Frage, in welcher Form Information in einem neuronalen Netz gespeichert ist.

Ein erster Ansatz geht davon aus, daß die Information in einem Neuronalen Netz im Spektralbereich codiert ist. Bei diesem Ansatz wird eine zeitliche Folge von Eingangsgrößen derart codiert, daß für jeden Zeitreihenwert einer zeitlichen Folge der Eingangsgrößen jeweils ein Eingangsneuron vorgesehen ist, an welches Eingangsneuron der jeweilige Zeitreihenwert gelegt wird.

Bei einem neuronalen Netz, welches gemäß diesem Ansatz ausgestaltet ist, wird üblicherweise als Aktivierungsfunktion eine tangens hyperbolicus (\tanh) -Funktion verwendet.

- 5 Diese erste Art eines neuronalen Netzes wird im weiteren als statisches neuronales Netz bezeichnet.

10 Nachteilig an diesem Ansatz ist insbesondere, daß es mit einem statischen neuronalen Netz nicht möglich ist, eine Dynamik eines Prozesses, welchem Prozeß ein technisches System unterliegt, explizit bei der internen Codierung der Folge von Eingangsgrößen zu berücksichtigen.

15 Die aus [4] bekannten Time-Delay-Neural-Networks (TDNN) versuchen diesem Nachteil dadurch zu begegnen, daß bei einer Mehrzahl von Folgen von Eingangsgrößen für jede Folge und für jeden Zeitreihenwert jeweils ein Eingangsneuron vorgesehen ist. Dieser Ansatz weist insbesondere den Nachteil auf, daß die Dimension des Eingaberaums, repräsentiert durch die Anzahl von Eingangsneuronen, mit wachsender Anzahl zu berücksichtigender unterschiedlicher Folgen von Eingangsgrößen exponentiell wächst.

25 Mit steigender Anzahl von Neuronen in dem neuronalen Netz ist ferner ein erhöhter Trainingsaufwand unter Verwendung einer mit steigender Anzahl Neuronen steigender Anzahl benötigter Trainingsdaten verbunden. Damit wird ein Trainieren eines statischen neuronalen Netzes unter diesen Bedingungen sehr rechenaufwendig bzw. praktisch nicht mehr durchführbar.

30 Zum Trainieren eines statischen neuronalen Netzes wird üblicherweise ein gradientenbasiertes Trainingsverfahren beispielsweise das Back-Propagation-Verfahren eingesetzt.

35 Aus [3] ist ferner für ein statisches neuronales Netz ein Trainingsverfahren bekannt, welches als ALOPEX-Verfahren bezeichnet wird. Bei diesem Verfahren wird das Lernen eines

statischen neuronalen Netzes als ein Optimierungsproblem betrachtet. Ziel der Optimierung ist in diesem Fall die Minimierung eines Fehlermaßes E unter Berücksichtigung von in dem statischen neuronalen Netz vorhandenen Gewichte, mit denen
5 die Verbindungen zwischen Neuronen gewichtet sind, für einen vorgegebenen Trainingsdatensatz mit Trainingsdaten.

Ein Trainingsdatum ist ein Tupel, welches Eingangsgrößen, beispielsweise Zustandsgrößen eines technischen Systems bzw.
10 Rahmenbedingungen, denen ein technisches System unterliegt, die einem technischen System zugeführt werden, sowie eine unter den Rahmenbedingungen ermittelte Ausgangsgröße, die von dem technischen System zu den Eingangsgrößen gebildet wird.

15 Das ALOPEX-Verfahren wird im weiteren im Zusammenhang mit dem Ausführungsbeispiel näher erläutert.

Ein zweiter Ansatz ist darin zu sehen, daß die Information über ein System in dem Zeitbereich und in dem Spektralbereich
20 codiert ist. Ein künstliches neuronales Netz, welches diesem Ansatz Rechnung trägt, weist sogenannte gepulste Neuronen auf und ist aus [2] bekannt.

Ein gepulstes Neuron wird gemäß [1] derart modelliert, daß
25 das Verhalten eines gepulsten Neurons hinsichtlich einer externen Stimulierung, die im weiteren als Eingangsgröße bezeichnet wird, durch eine stochastische Differentialgleichung des Itô-Typs gemäß folgender Vorschrift beschrieben wird:

$$30 \quad dV(t) = \left(-\frac{V(t)}{\tau} + \mu \right) dt + \sigma dW(t) + w dS(t). \quad (1)$$

In der Vorschrift (1) wird mit $dW(t)$ ein Standard-Wiener-Prozeß bezeichnet. Eine vorgegebene Konstante τ beschreibt eine Verzögerung eines Membranpotentials $V(t)$ des modellier-
35 ten Neurons ohne Eingangsgröße, die an dem Neuron anliegt. Durch das Modell wird ein biologisches Neuron in seinem Ver-

halten nachgebildet. Aus diesem Grund wird ein gepulstes Neuron auch als biologisch orientiertes Neuron bezeichnet.

5 Ferner wird mit $S(t)$ eine Kopplung des Neurons mit einem anderen Neuron bezeichnet, d.h. es gilt:

$$s(t) = \frac{d}{dt} S(t) = \sum_i \delta(t - t_i), \quad (2)$$

10 wobei mit t_i eine Ankommzeit bezeichnet wird, zu der ein externer Impuls an einem Eingang eines Neurons ankommt. Eine soma-synaptische Stärke wird durch eine synaptische Größe w modelliert.

15 In diesem Modell wird von dem gepulsten Neuron ein Impuls generiert, wenn das Membranpotential $V(t)$ einen vorgegebenen Schwellenwert Θ erreicht. Nach Generierung des Impulses wird das Membranpotential $V(t)$ des Neurons auf einen vorgegebenen Initialisierungs-Potentialwert $V(0)$ zurückgesetzt.

20 Eine zeitliche Folge von Impulsen wird somit gemäß folgender Vorschrift beschrieben:

$$t'_0, \dots, t'_k, \dots, \quad (3)$$

25 und genügt folgender Vorschrift:

$$o(t) = \sum_k \delta(t - t'_k). \quad (4)$$

30 Ferner ist aus [1] bekannt, daß unter der Annahme des oben beschriebenen Modells für ein gepulstes Neuron ein Unterscheidungswert $I(T)$ gebildet werden kann, mit dem angegeben wird, mit welcher Verlässlichkeit eine Folge von Eingangsgrößen korrekt klassifiziert wird hinsichtlich der für ein Training des neuronalen Netzes verwendeten Trainingsdaten.

Der Unterscheidungswert $I(T)$ ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb eines Zeitraums $[0; T]$ gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden. Der Unterscheidungswert $I(T)$ genügt folgender Vorschrift:

$$I(T) = I \left[s; \left\{ \begin{array}{l} t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \\ t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \end{array} \right\} \right], \quad (5)$$

wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
 - $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
 - mit k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
 - N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.
- Für ein Neuronales Netz mit einer Mehrzahl von N Neuronen ergibt sich eine stochastische Differentialgleichung des Itô-Typs gemäß folgender Vorschrift beschrieben wird:

$$dV_i(t) = \left(-\frac{V_i(t)}{\tau} + \mu \right) dt + \sigma dW_i(t) + \sum_{j=1}^N w_{ij} \sum_k \delta(t - t_{k-\Delta_{ij}}^{(j)}) dt + I_i(t) dt, \quad (6)$$

wobei mit

- $V_i(t)$ ein Membranpotential des i -ten Neurons bezeichnet wird ($i = 1, \dots, N$),
- N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener Neuronen bezeichnet wird,

- w_{ij} jeweils ein Gewicht einer Kopplung zwischen dem i -ten und dem j -ten Neuron bezeichnet wird, anschaulich eine synaptische Stärke zwischen den Neuronen i und j ,
- Δ_{ij} eine vorgebbare axonale Verzögerungszeit eines Signals zwischen den Neuronen i und j bezeichnet wird,
- $I_i(t)$ ein externes Stimulierungssignal des Neurons i bezeichnet wird.

Aus [4] ist ein Trainingsverfahren für ein neuronales Netz bekannt. Bei diesem Verfahren wird das neuronale Netz mit dem Modell eines technischen Systems in einen Regelkreis derart eingebunden, daß das neuronale Netz als Ausgangsgröße mindestens eine Stellgröße an das Modell abgibt und das Modell aus der vom Neuronennetz zugeführten Stellgröße mindestens eine Regelgröße erzeugt, die dem neuronalen Netz als Eingangsgröße zugeführt wird. Die Stellgröße wird mit einem Rauschen von bekannter Rauschverteilung überlagert, bevor sie dem Modell zugeführt wird. Die Gewichte des neuronalen Netzes werden in Reaktion auf die durch das aufgeprägte Rauschen veränderte Regelgröße wie folgt eingestellt: Es wird von einer Kostenfunktion bewertet, ob die Gewichtsänderung am Netz eine Verbesserung der Regelgröße in Bezug auf ein Sollverhalten des Modells bewirkt hat und solche Gewichtseinstellungen werden durch die Kostenfunktion begünstigt.

Der Erfindung liegt das Problem zugrunde, ein Verfahren sowie eine Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes mit gepulsten Neuronen anzugeben. Ferner liegt der Erfindung das Problem zugrunde, ein Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines neuronalen Netzes mit gepulsten Neuronen sowie ein neuronales Netz mit gepulsten Neuronen anzugeben.

Die Probleme werden durch die Verfahren und die Anordnung sowie durch das neuronale Netz mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst.

Ein Verfahren zum Trainieren eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält, weist folgende Schritte auf:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird,
5 wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgroßen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
10
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
15
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,
20
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

25

Ein Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgroßen unter Verwendung eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält und gemäß folgenden Schritten trainiert worden ist, weist folgende Schritte auf:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird,
30 wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgroßen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
35

- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
- der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist,
 - die Folge von Eingangsgrößen wird dem neuronalen Netz zugeführt,
- d) ein Klassifikationssignal wird gebildet, mit dem angegeben wird, welcher Art einer Folge von Eingangsgrößen die zugeführte Folge ist.

Ein neuronales Netz, welches gepulste Neuronen enthält, ist gemäß folgenden Schritten trainiert worden:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit

einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,

- sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

Eine Anordnung zum Trainieren eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält, weist einen Prozessor auf, der derart eingerichtet ist, daß folgende Schritte durchführbar sind:

- a) für einen ersten Zeitraum wird das neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem neuronalen Netz zugeführt werden,
- c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangegangenen Iteration gebildet wird,
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte neuronale Netz ist das neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

Durch die Erfindung wird es möglich, mittels eines neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält, eine zeitliche

Folge von Eingangsgrößen zu klassifizieren, wobei gewährleistet ist, daß bei optimierter Klassifikationssicherheit eine minimierte Anzahl von Zeitwerten dem neuronalen Netz zur Klassifikation zugeführt werden müssen.

5

Bevorzugte Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen.

10

Bevorzugt wird zur Maximierung des ersten Unterscheidungswerts und/oder des zweiten Unterscheidungswerts ein nicht gradientenbasiertes Optimierungsverfahren eingesetzt, bevorzugt ein auf dem ALOPEX-Verfahren basierendes Optimierungsverfahren.

15

Der erste Unterscheidungswert genügt vorzugsweise folgender Vorschrift:

$$I(T) = I \left[s; \left\{ \begin{array}{l} t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \\ t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \end{array} \right\} \right], \quad (7)$$

20 wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
- $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
- 25 • mit k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
- N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.

30

In einer weiteren Ausgestaltung genügt der erste Unterscheidungswert folgender Vorschrift

$$\begin{aligned}
 I(T) = & - \int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} + \\
 & + \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out}|s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out}|s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} \quad (8)
 \end{aligned}$$

mit

$$5 \quad p(\text{out}) = \sum_{j=1}^S p_j p(\text{out}|s^{(j)}), \quad (9)$$

wobei mit

- $s^{(j)}$ eine Eingangsgröße bezeichnet wird, die an das Neuronale Netz zu einem Zeitpunkt j angelegt wird,
- 10 • p_j eine Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird,
- $p(\text{out}|s^{(j)})$ eine bedingte Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, ein Impuls von einem gepulsten Neuron in dem Neuronalen Netz generiert wird unter der Bedingung, daß zu einem
- 15 Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird.

Die Trainings-Folgen von Eingangsgrößen sind bevorzugt gemessene physikalische Signale.

20

Somit sind die Verfahren und die Anordnungen im Rahmen der Beschreibung eines technischen Systems, insbesondere zur Beschreibung bzw. Untersuchung eines mehrkanaligen Signals, welches durch einen Elektroencephalographen aufgenommen worden ist und ein Elektroencephalogramm beschreibt, einsetzbar.

25

Die Verfahren und die Anordnungen können ferner zur Analyse multivarianter Finanzdaten in einem Finanzmarkt zur Analyse ökonomischer Zusammenhänge eingesetzt werden.

30

Die beschriebenen Verfahrensschritte können sowohl in Software für den Prozessor als auch in Hardware, d.h. mittels einer Spezialschaltung, realisiert werden.

- 5 Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in den Figuren dargestellt und wird im weiteren näher erläutert.

Es zeigen

- 10 Figur 1 ein Ablaufdiagramm, indem die einzelnen Verfahrensschritte des Ausführungsbeispiels dargestellt sind;

- Figur 2 eine Skizze eines Elektroencephalographen und einem Patienten für den ein Elektroencephalogramm erstellt wird;
15

Figur 3 eine Skizze eines neuronalen Netzes gemäß dem Ausführungsbeispiel;

- 20 Figur 4 eine Skizze, anhand der das Prinzip, welches dem Ausführungsbeispiel zugrunde liegt, dargestellt wird.

Fig.2 zeigt einen Patienten 200, an dessen Kopf 201 Sensoren 202, 203, 204, 205 und 206 angebracht sind zur Aufnahme von
25 Gehirnstömen. Von den Sensoren 202, 203, 204, 205, 206 aufgenommene elektrische Signale 207, 208, 209, 210 und 211 werden einem Elektroencephalographen 220 über eine erste Eingangs-/Ausgangsschnittstelle 221 zugeführt. Der Elektroencephalograph 220 weist mehrere Eingangskanäle auf. Über die Ein-
30 gangs-/Ausgangsschnittstelle 221, die mit einem Analog-/Digital-Wandler 222 verbunden ist, werden die elektrischen Signale dem Elektroencephalographen 220 zugeführt und in dem Analog-/Digital-Wandler 222 digitalisiert und jedes aufgenommene elektrische Signal wird als eine Folge von Zeitreihen-
35 werten in einem Speicher 223 gespeichert.

Somit ist eine Folge von Zeitreihenwerten durch ein Abtastintervall sowie durch eine Zeitdauer, im weiteren als Zeitraum bezeichnet, charakterisiert, während der jeweils ein elektrisches Signal aufgenommen wird. Der Speicher 223 ist mit dem
5 Analog-/Digital-Wandler 222 sowie mit einem Prozessor 224 und einer zweiten Eingangs-/Ausgangsschnittstelle 225 über einen Bus 226 verbunden.

Mit der zweiten Eingangs-/Ausgangsschnittstelle 225 ist ferner
10 über ein erstes Kabel 227 ein Bildschirm 228, über ein zweites Kabel 229 eine Tastatur 230 und über ein drittes Kabel 231 eine Computermouse 232 verbunden.

Auf dem Bildschirm 228 werden Ergebnisse der Untersuchung des
15 Patienten 200 dargestellt. Über die Tastatur 230 bzw. die Computermouse 232 können von einem Benutzer (nicht dargestellt) Eingaben in das System erfolgen.

Der Prozessor 224 ist derart eingerichtet, daß die im weiteren
20 beschriebenen Verfahrensschritte durchführbar sind.

Jeweils eine Folge von Zeitreihenwerten sowie eine Angabe, welcher Klasse von Zeitreihenwerten die Folge von Zeitreihenwerten zuzuordnen ist, bilden ein Trainingsdatum.
25

Eine Vielzahl von Trainingsdaten bilden einen Trainingsdatensatz, mit dem ein im weiteren beschriebenes neuronales Netz
301 trainiert wird.

30 **Fig.3** zeigt das neuronale Netz 301 mit gepulsten Neuronen.

An jeweils ein Eingangsneuron 302, 303, 304 einer Eingangsschicht 305 wird jeweils eine Folge 306, 307, 308 von Zeitreihenwerten angelegt. Jeder angelegte Folge 306, 307, 308
35 von Zeitreihenwerten ist im Rahmen des Trainingsverfahrens eine Angabe zugeordnet, ob es sich bei dieser Folge 306, 307, 308 der Zeitreihenwerte, im weiteren als Eingabemuster 306,

307, 308 bezeichnet, um ein Eingabemuster 306, 307, 308 einer ersten Klasse oder um ein Eingabemuster 306, 307, 308 einer zweiten Klasse handelt.

- 5 Jeweils ein Eingangsneuron 302, 303, 304 ist mit einem Zwischenneuron 309, 310, 311 einer Zwischenschicht 312 jeweils über eine gewichtete Verbindung 313, 314, 315 verbunden.

- 10 Die Zwischenneuronen 309, 310, 311 sind miteinander über Verbindungen 316, 317, 318, 319, 320, 321 verbunden, die ebenfalls gewichtet sind.

- 15 Die Zwischenneuronen 309, 310, 311 sind ferner mit weiteren gepulsten Neuronen 322, 323, 324 über gewichtete Verbindungen 325, 326, 327, 328, 329 und 330 verbunden.

Die gepulsten Neuronen weisen jeweils das oben beschriebene Verhalten auf, welches in [2] dargestellt ist.

- 20 Die Zwischenneuronen 309, 310, 311 sind mit mehreren Zwischenneuronen 309, 310, 311 verbunden, jeweils die weiteren gepulsten Neuronen 322, 323, 324 sind jeweils mit genau einem Zwischenneuron 309, 310, 311 verbunden. Auf diese Weise ist es möglich, eine lang reichende Beeinflussung zwischen Neuro-
25 nen eines neuronalen Netzes sowie auch eine lokale Beeinflussung von Neuronen innerhalb des Neuronalen Netzes zu modellieren.

- 30 Mit den weiteren gepulsten Neuronen 322, 323, 324 ist ein Ausgangsneuron 331 über gewichtete Verbindungen 332, 333 und 334 verbunden. Von dem Ausgangsneuron 331 wird ein Ausgangssignal 335 gebildet, mit dem angegeben wird, welcher Klasse das Eingabemuster 306, 307, 308 zugehörig ist.

- 35 In der Trainingsphase des neuronalen Netzes 301 wird die Ausgangsgröße 335 mit der dem jeweiligen Eingabemuster zugeordneten Klassifikationsangabe verglichen und es wird ein Feh-

lersignal E gebildet, welches verwendet wird zur Anpassung der Gewichte, der in dem Neuronalen Netz 301 vorhandenen Verbindungen zwischen den Neuronen.

5 Als Trainingsverfahren wird im Rahmen dieses Ausführungsbeispiels das nicht gradientenbasierte Verfahren gemäß dem ALOPEX-Verfahren eingesetzt. Das Ziel des ALOPEX-Verfahrens ist die Minimierung eines Fehlermaßes E unter Berücksichtigung und Adaptierung der Gewichte w_{bc} für einen Trainingsdatensatz.
10

Das ALOPEX-Verfahren wird im weiteren näher erläutert.

Ein Neuron b ist mit einem Neuron c über eine Verbindung verbunden, die mit dem Gewicht w_{bc} gewichtet ist. Während einer f-ten Iteration wird das Gewicht w_{bc} gemäß folgender Vorschrift aktualisiert:
15

$$w_{bc}(f) = w_{bc}(f - 1) + \delta_{bc}(f), \quad (10)$$

20

wobei mit $\delta_{bc}(f)$ eine kleine positive oder negative vorgegebene Schrittweite δ gemäß folgender Vorschrift bezeichnet wird:

$$25 \quad \delta_{bc}(f) = \begin{cases} -\delta & \text{mit einer Wahrscheinlichkeit } p_{bc}(f) \\ +\delta & \text{mit einer Wahrscheinlichkeit } 1 - p_{bc}(f) \end{cases}. \quad (11)$$

Eine Wahrscheinlichkeit $p_{bc}(f)$ wird gebildet gemäß folgender Vorschrift:

$$30 \quad p_{bc}(f) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{C_{bc}(f)}{T(f)}}}, \quad (12)$$

wobei $C_{bc}(f)$ gemäß folgender Vorschrift gebildet wird:

$$C_{bc}(f) = \Delta w_{bc}(f) \cdot \Delta E(f). \quad (13)$$

Mit $T(f)$ wird ein vorgebbare Wert bezeichnet. Mit $\Delta w_{bc}(f)$ und $\Delta E(f)$ werden die Gewichtsänderungen $\Delta w_{bc}(f)$ der Gewichte w_{bc} bzw. die Änderung $\Delta E(f)$ des Fehlermaßes E während der
 5 vorangegangenen zwei Iterationen bezeichnet gemäß folgenden Vorschriften:

$$\Delta w_{bc}(f) = w_{bc}(f-1) + w_{bc}(f-2), \quad (14)$$

$$10 \quad \Delta E_{bc}(f) = E_{bc}(f-1) + E_{bc}(f-2). \quad (15)$$

Der vorgegebene Wert $T(f)$ wird alle F Iterationen aktualisiert gemäß folgender Vorschrift:

$$15 \quad T(f) = \frac{1}{FM} \sum_b \sum_c \sum_{f'=f-F}^{f-1} |c_{bc}(f')| \quad (16)$$

wenn f ein ganzzahliges Vielfaches von F ist, und

$$T(f) = T(f-1) \quad \text{sonst}, \quad (17)$$

20 wobei mit M eine Anzahl von Verbindungen in dem neuronalen Netz 301 bezeichnet wird.

Gleichung (16) kann vereinfacht werden zu folgender Vorschrift:

$$25 \quad T(f) = \frac{\delta}{F} \sum_{f'=f-F}^{f-1} |\Delta E(f')|. \quad (18)$$

Das neuronale Netz 301 wird unter Verwendung des Trainingsdatensatzes gemäß dem oben beschriebenen Trainingsverfahren
 30 trainiert.

Ferner wird ein erster Unterscheidungswert $I(T)$ für das neuronale Netz 301 gemäß folgender Vorschrift gebildet:

$$I(T) = I \left(s; \left\{ t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \right. \right. \\ \left. \left. t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \right\} \right), \quad (19)$$

wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
- 5 • $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
- mit k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums
- 10 $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
- N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.

Der erste Unterscheidungswert $I(T)$ entspricht anschaulich der

15 Differenz folgender Entropien:

$$I(T) = H(\text{out}) - \langle H(\text{out}|s) \rangle_s, \quad (20)$$

mit

$$20 \quad H(\text{out}) = - \int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} \quad (21)$$

und

$$25 \quad \langle H(\text{out}|s) \rangle_s = - \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out}|s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out}|s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)}. \quad (22)$$

Damit ergibt sich der erste Unterscheidungswert $I(T)$ gemäß folgender Vorschrift:

30

$$\begin{aligned}
 I(T) = & - \int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} + \\
 & + \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out}|s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out}|s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} \quad (23)
 \end{aligned}$$

mit

$$p(\text{out}) = \sum_{j=1}^S p_j p(\text{out}|s^{(j)}), \quad (24)$$

wobei mit

- $s^{(j)}$ eine Eingangsgröße bezeichnet wird, die an das Neuronale Netz zu einem Zeitpunkt j angelegt wird,
- 10 • p_j eine Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird,
- $p(\text{out}|s^{(j)})$ eine bedingte Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, ein Impuls von einem gepulsten Neuron in dem Neuronalen Netz generiert wird unter der Bedingung, daß zu einem
- 15 Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird.

Ist im Rahmen des Trainings des neuronalen Netzes 301 ein maximaler erster Unterscheidungswert $I(T)$ ermittelt worden, so bedeutet dies, daß das in dem ersten Zeitraum beobachtete Eingangsmuster 306, 307, 308 genug Information enthält, um mit ausreichender Verlässlichkeit das Eingabemuster zu klassifizieren.

25

Anschaulich wird im Rahmen des Trainings für einen ersten Zeitraum $[0; T]$ der erste Unterscheidungswert $I(T)$ gebildet (Schritt 101) (vgl. **Fig.1**).

30 In einem weiteren Schritt (Schritt 102) wird ein zweiter Zeitraum durch Verkürzung des ersten Zeitraums gebildet:

[0; T'], wobei $T' < T$.

Für den zweiten Zeitraum [0; T'] wird in einem weiteren
5 Schritt (Schritt 103) ein zweiter Unterscheidungswert $I(T')$
auf die gleiche, oben beschriebene Weise wie der erste Unter-
scheidungswert $I(T)$ gebildet.

Der erste Unterscheidungswert $I(T)$ wird mit dem zweiten Un-
10 terscheidungswert $I(T')$ verglichen (Schritt 104).

Ist der zweite Unterscheidungswert $I(T')$ gleich dem ersten
Unterscheidungswert $I(T)$, so wird ein neuer zweiter Zeitraum
durch Verkürzung des zweiten Zeitraums [0; T'] gebildet
15 (Schritt 105) und der neue zweite Zeitraum wird als der zwei-
te Zeitraum angesehen (Schritt 106). Für den zweiten Zeitraum
der neuen Iteration wird wiederum ein zweiter Unterschei-
dungswert $I(T')$ (Schritt 103) gebildet.

20 Anschaulich bedeutet dieses iterative Verfahren, daß der
Zeitraum, in dem von den gepulsten Neuronen generierte Impul-
se berücksichtigt werden zur Bildung des Ausgangssignals so-
lange verkürzt wird, bis der zweite Unterscheidungswert $I(T')$
ungleich dem ersten Unterscheidungswert $I(T)$ ist.

25 Ist der zweite Unterscheidungswert $I(T')$ kleiner als der er-
ste Unterscheidungswert, so wird das neuronale Netz 301 als
optimiertes neuronales Netz betrachtet, welches in der letz-
ten vorangegangenen Iteration trainiert wurde, bei dem der
30 zweite Unterscheidungswert $I(T')$ nicht kleiner als der erste
Unterscheidungswert $I(T)$ war (Schritt 107).

Der jeweils berücksichtigte Zeitraum wird in diskrete Unter-
zeiträume unterteilt, für die jeweils lediglich ermittelt
35 wird, ob während dieses Unterzeitraums ein Neuron einen Im-
puls generiert hat oder nicht.

Auf diese Weise wird der für das Training benötigte Rechenaufwand erheblich reduziert.

5 Zur weiteren Veranschaulichung wird das Prinzip anhand Fig.4 noch einmal erläutert.

Fig.4 zeigt zwei kontinuierliche Prozesse p1 und p2, die durch eine Menge von kontinuierlichen Eingangssignalen S1 und S2 gebildet sind. Nach entsprechender, oben beschriebener Digitalisierung liegen zwei Folgen von Eingangsgrößen vor, die
10 Eingabemuster. Die Eingabemuster werden dem trainierten neuronalen Netz 401 in einer Anwendungsphase zugeführt, und es wird anhand der Zeitreihen für das trainierte neuronale Netz 401 anschaulich eine raum-zeitliche Codierung der Prozesse
15 p1, p2 durchgeführt.

Anhand eines Ausgangssignals 402 wird durch das trainierte neuronale Netz 401 angegeben, um welche Art von Prozeß es sich bei dem Eingabemuster handelt. Das trainierte neuronale
20 Netz 401 weist die Eigenschaft auf, daß zum einen die Zuverlässigkeit der Klassifikation optimiert ist und zum anderen eine minimale Anzahl von Zeitreihenwerten, also ein minimaler zweiter Zeitraum 403 erforderlich ist, um die Klassifikation verläßlich durchzuführen.

25 Im weiteren werden einige Alternativen zu dem oben beschriebenen Ausführungsbeispiel dargestellt:

Die Anzahl von Eingängen, gepulsten Neuronen sowie Ausgangssignalen ist im allgemeinen beliebig. Auch die Anzahl verschiedener Folgen von Zeitreihenwerten im Rahmen der Klassifikation sowie des Trainings ist beliebig. Damit ist eine Elektroencephalogramm-Analyse für eine beliebige Anzahl von
30 Kanälen zur Tumorcharakterisierung möglich.

In diesem Dokument sind folgende Veröffentlichungen zitiert:

- [1] G. Deco und B. Schürmann, Information Transmission and
Temporal Code in Central Spiking Neurons, Physical Re-
view Letters, Vol. 79, Nr. 23, S. 4697 - 4700, December
5 1997
- [2] W. Gerstner, Time structure of the activity in neural
network models, Physical Review E, Vol. 51, Nr. 1,
10 S. 738 - 758, January 1995
- [3] K.P. Unnikrishnan and K.P. Venugopal, Alopex: A Correla-
tion-Based Learning Algorithm for Feedforward and Recur-
rent Neural Networks, S. 471 - 490, Neural Computation,
15 Vol. 6, 1994
- [4] DE 195 31 967 C2

Patentansprüche

1. Verfahren zum Trainieren eines Neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält,
 - 5 a) bei dem für einen ersten Zeitraum ($[0;T]$) das Neuronale Netz derart trainiert wird, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
 - b) bei dem der Unterscheidungswert abhängig ist von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten
10 Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
 - c) bei dem iterativ folgende Schritte durchgeführt werden:
15 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
- für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
- ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten
20 Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,
- sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte
25 Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
30 bei dem zur Maximierung des ersten Unterscheidungswerts und/oder des zweiten Unterscheidungswerts ein nichtgradientenbasiertes Optimierungsverfahren eingesetzt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 2,
35 bei dem das Optimierungsverfahren auf dem ALOPEX-Verfahren basiert.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
bei dem der erste Unterscheidungswert $I(T)$ folgender Vorschrift genügt:

$$5 \quad I(T) = I \left(s; \left\{ \begin{array}{l} t_1^{(1)}, \dots, t_m^{(1)}, \dots, t_{k_1}^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_m^{(2)}, \dots, t_{k_2}^{(2)}, \dots, \\ t_1^{(n)}, \dots, t_m^{(n)}, \dots, t_{k_n}^{(n)}, \dots, t_1^{(N)}, \dots, t_m^{(N)}, \dots, t_{k_N}^{(N)} \end{array} \right\} \right),$$

wobei mit

- s die Eingangsgrößen bezeichnet werden,
- $t_m^{(n)}$ ein Impuls bezeichnet wird, der von einem gepulsten
10 Neuron n zu einem Zeitpunkt m innerhalb eines Zeitraums $[0, T]$ generiert wird,
- k_n ($n = 1, \dots, N$) ein Zeitpunkt bezeichnet wird, zu dem das gepulste Neuron n den innerhalb des Zeitraums $[0, T]$ letzten Impuls generiert hat,
- 15 • N eine Anzahl in dem Neuronalen Netz enthaltener gepulster Neuronen bezeichnet wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4,
bei dem der erste Unterscheidungswert $I(T)$ folgender Vorschrift genügt:
20

$$I(T) = - \int p(\text{out}) \cdot \ln(p(\text{out})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)} + \\ + \sum_{j=1}^S p_j \int p(\text{out} | s^{(j)}) \cdot \ln(p(\text{out} | s^{(j)})) dt_1^{(1)} \dots dt_{k_1}^{(1)} \dots dt_{k_N}^{(N)}$$

mit

25

$$p(\text{out}) = \sum_{j=1}^S p_j p(\text{out} | s^{(j)}),$$

wobei mit

- $s^{(j)}$ eine Eingangsgröße bezeichnet wird, die an das Neuronale Netz zu einem Zeitpunkt j angelegt wird,
 - p_j eine Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird,
 - $p(\text{outs}^{(j)})$ eine bedingte Wahrscheinlichkeit dafür bezeichnet wird, daß ein Impuls von einem gepulsten Neuron in dem Neuronalen Netz generiert wird unter der Bedingung, daß zu einem Zeitpunkt j die Eingangsgröße $s^{(j)}$ an das Neuronale Netz angelegt wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen gemessene physikalische Signale sind.
7. Verfahren nach Anspruch 6, bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen gemessene Signale eines Electroencephalogramms sind.
8. Verfahren zur Klassifikation einer Folge von Eingangsgrößen unter Verwendung eines Neuronalen Netzes, welches gepulste Neuronen enthält und gemäß folgenden Schritten trainiert worden ist:
- a) für einen ersten Zeitraum wird das Neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
 - b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
 - c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,

- ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist,
 - bei dem die Folge von Eingangsgrößen dem Neuronalen Netz zugeführt wird,
 - bei dem ein Klassifikationssignal gebildet wird, mit dem angegeben wird, welcher Art einer Folge von Eingangsgrößen die zugeführte Folge ist.
9. Verfahren nach Anspruch 8,
bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen und die Folge von Eingangsgrößen gemessene physikalische Signale sind.
10. Verfahren nach Anspruch 9,
bei dem die Trainings-Folge von Eingangsgrößen und die Folge von Eingangsgrößen gemessene Signale eines Electroencephalogramms sind.
11. Neuronales Netz, welches gepulste Neuronen enthält und gemäß folgenden Schritten trainiert worden ist:
- a) für einen ersten Zeitraum wird das Neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird, wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
 - b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgrößen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
 - c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,

- für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit
 - 5 einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,
 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem
 - 10 ersten Unterscheidungswert ist.
12. Neuronales Netz nach Anspruch 10, eingesetzt zur Klassifikation eines physikalischen Signals.
- 15
13. Neuronales Netz nach Anspruch 10, eingesetzt zur Klassifikation eines Signals eines Electroencephalogramms.
14. Anordnung zum Trainieren eines Neuronalen Netzes, welches
- 20 gepulste Neuronen enthält,
- mit einem Prozessor, der derart eingerichtet ist, daß folgende Schritte durchführbar sind:
- a) für einen ersten Zeitraum wird das Neuronale Netz derart trainiert, daß ein Unterscheidungswert maximiert wird,
- 25 wodurch ein maximaler erster Unterscheidungswert gebildet wird,
- b) der Unterscheidungswert ist abhängig von Impulsen, die von den gepulsten Neuronen innerhalb des ersten Zeitraums gebildet werden sowie von einer Trainings-Folge von Eingangsgroßen, die dem Neuronalen Netz zugeführt werden,
- 30 c) iterativ werden folgende Schritte durchgeführt:
 - der erste Zeitraum wird zu einem zweiten Zeitraum verkürzt,
 - für den zweiten Zeitraum wird ein zweiter Unterscheidungswert gebildet,
 - 35 - ist der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert, so erfolgt eine neue Iteration mit

einem neuen zweiten Zeitraum, der durch Verkürzung des zweiten Zeitraums der vorangeegangenen Iteration gebildet wird,

- 5 - sonst wird das Verfahren beendet und das trainierte Neuronale Netz ist das Neuronale Netz der letzten Iteration, bei der der zweite Unterscheidungswert gleich dem ersten Unterscheidungswert ist.

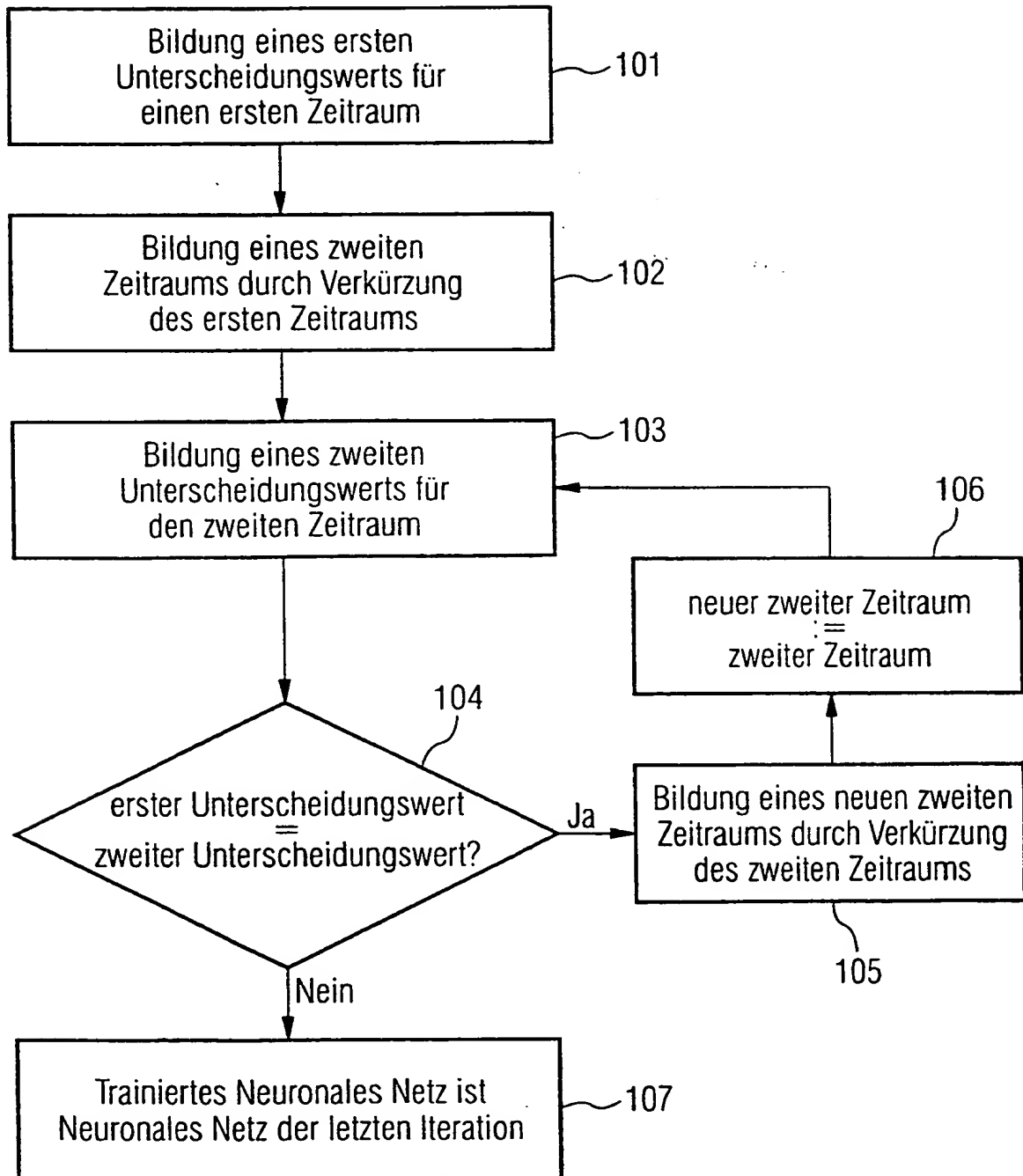
10 15. Anordnung nach Anspruch 14, eingesetzt zur Klassifikation eines physikalischen Signals.

16. Anordnung nach Anspruch 14, eingesetzt zur Klassifikation eines Signals eines Electroencephalogramms.

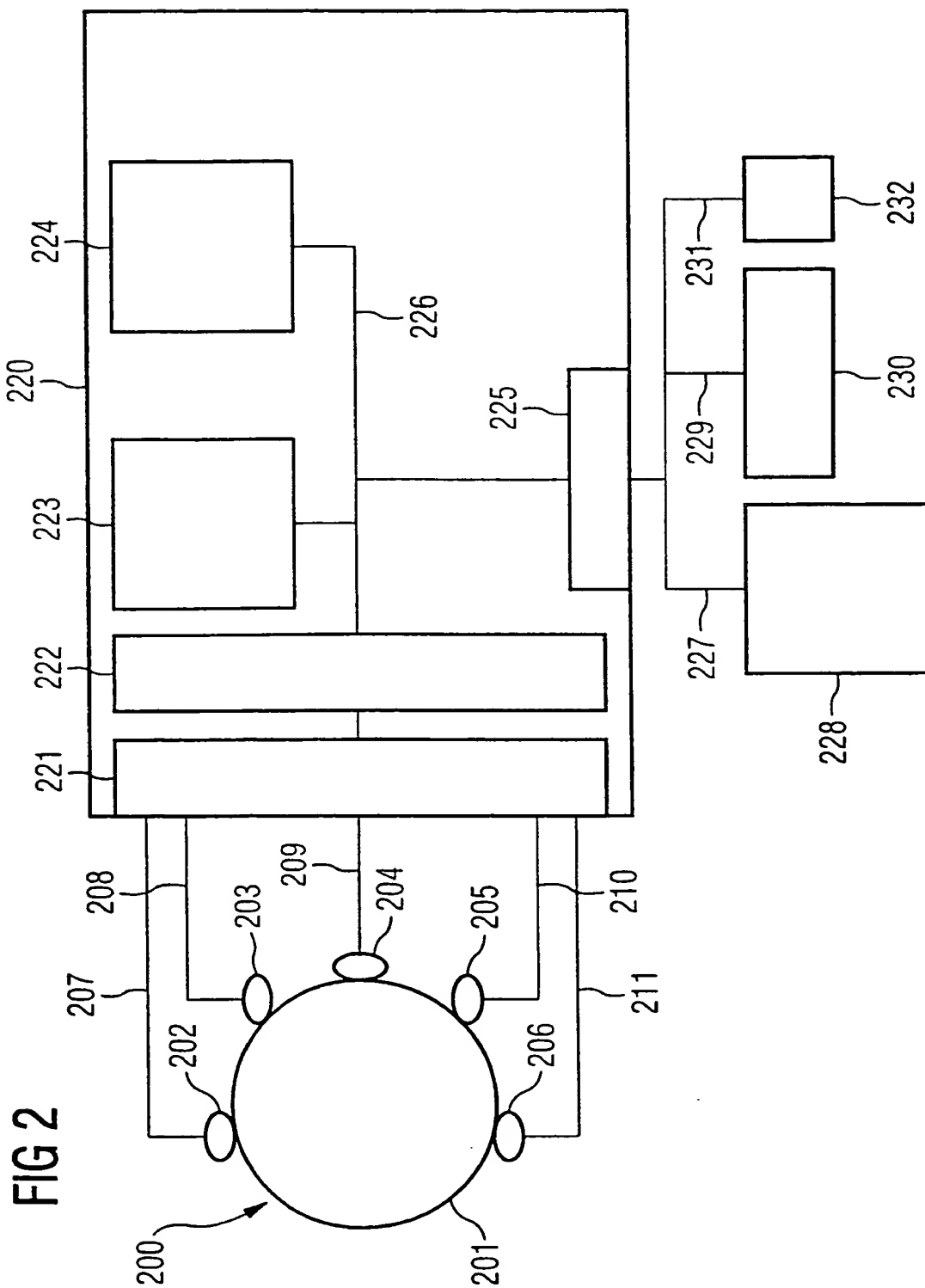
THIS PAGE BLANK (USPTO)

1/4

FIG 1



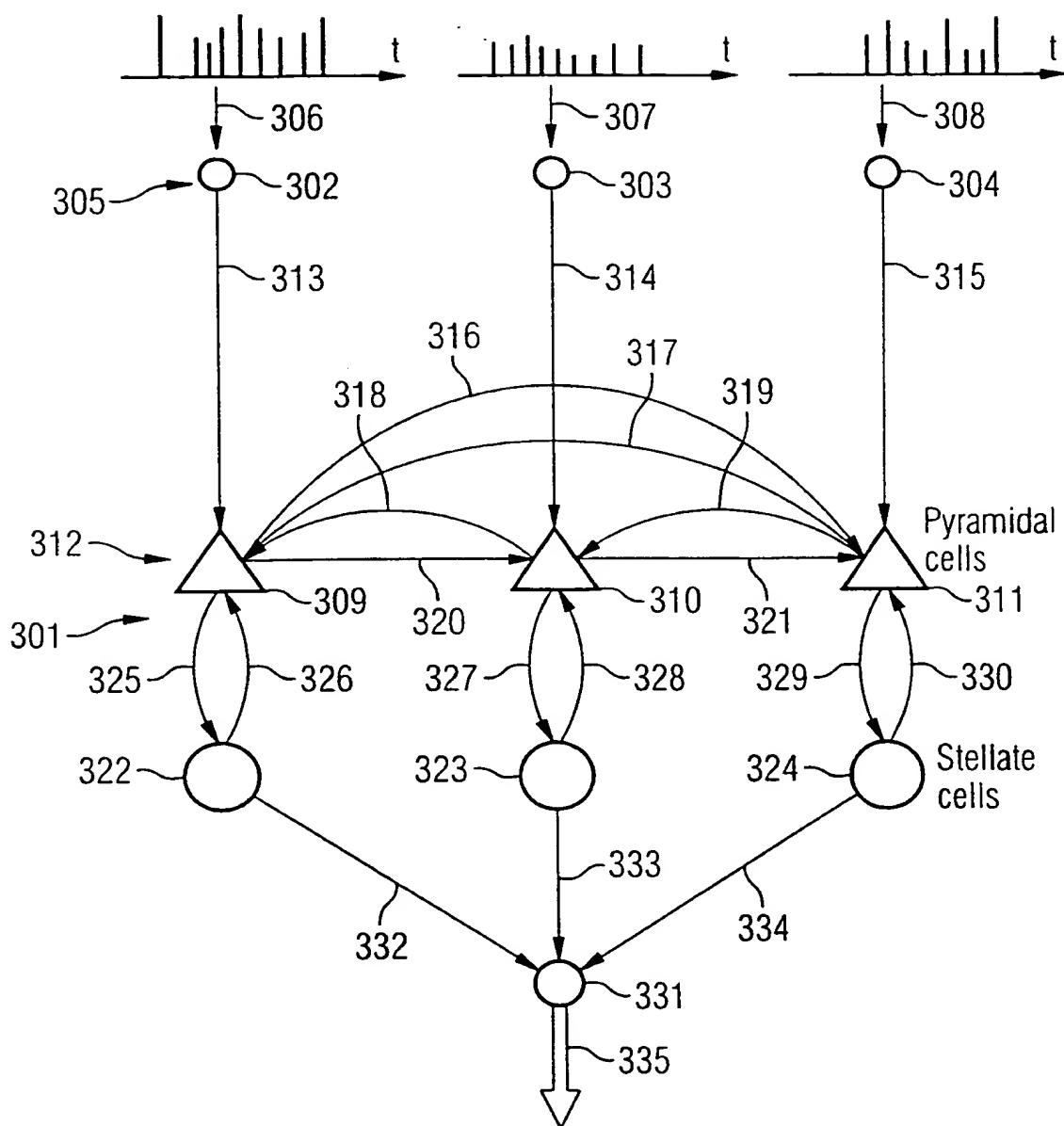
THIS PAGE BLANK (USPTO)



THIS PAGE BLANK (USPTO)

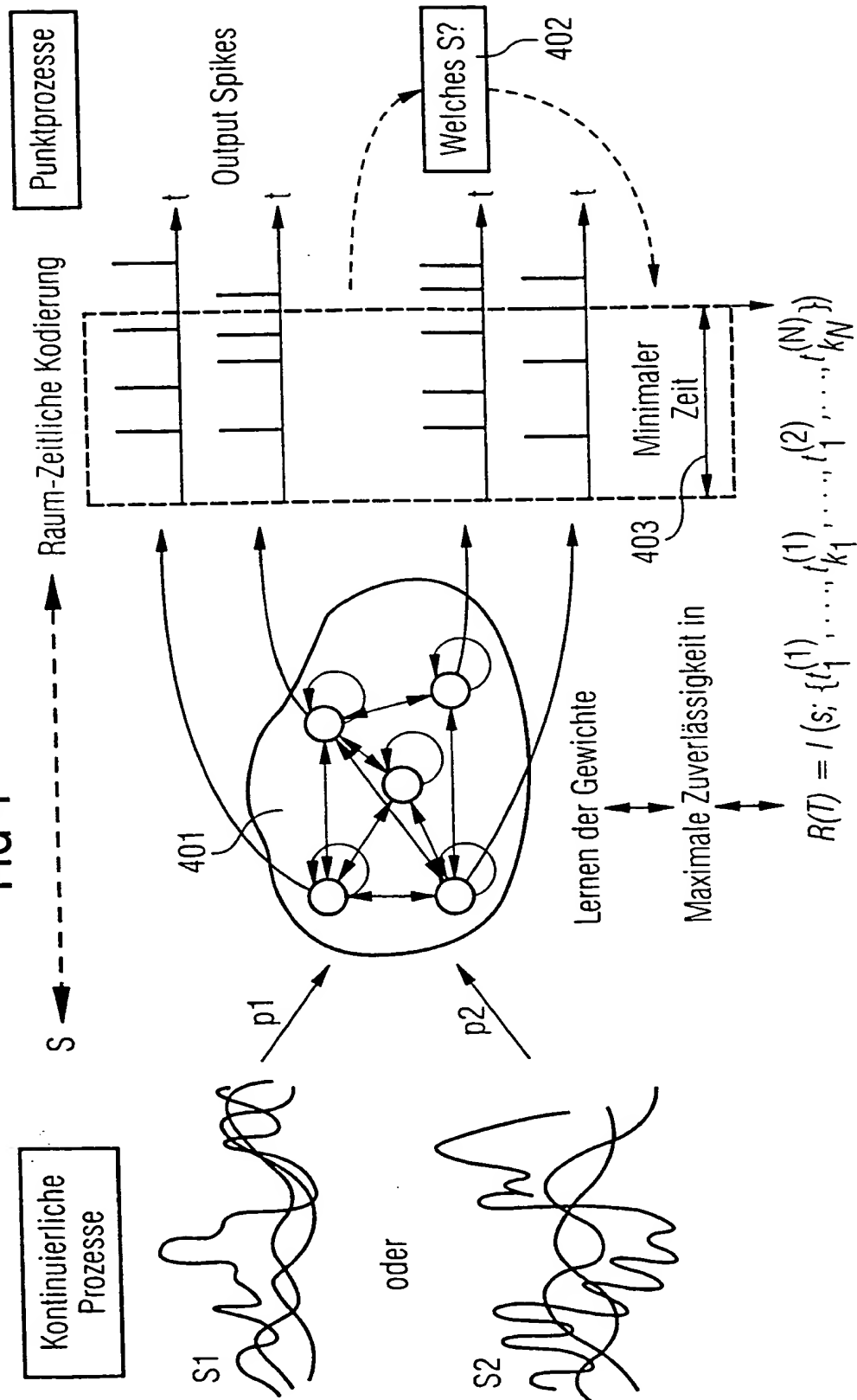
3/4

FIG 3



THIS PAGE BLANK (USPTO)

FIG 4



THIS PAGE BLANK (USPTO)